

引用格式:耿梦清,唐夏雨,李雪草,等. 基于遥感技术的盐渍土监测研究进展与展望[J]. 世界科技研究与发展, 2025, 47(1): 60-81.

基于遥感技术的盐渍土监测研究 进展与展望^{*}

耿梦清¹ 唐夏雨¹ 李雪草^{*,1,2} 温亚楠³ 李保国¹ 刘涵^{4,5} 黄健熙^{1,2}
孔祥斌¹ 张超¹ 苗双喜^{1,2}

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100083; 2. 农业农村部农业灾害遥感重点实验室, 北京 100083; 3. 中国地质大学信息工程学院, 北京 100083; 4. 自然资源部国土整治中心, 北京 100035; 5. 国务院国资委科技创新局, 北京 100053)

摘要: 土壤盐渍化是制约农业生态和社会经济可持续发展的重要因素, 目前已成为一个全球性环境问题。遥感技术作为探测和识别远距离目标的高新技术之一, 具有综合、宏观、动态等特点, 已在盐渍土分布、盐渍化程度和动态变化监测方面得到广泛应用。为准确、全面的认识和梳理遥感技术在盐渍土应用中的研究进展、局限性及未来发展趋势, 以期更好地服务于盐渍土治理与开发利用、土地资源配置及社会经济发展等, 本研究以盐渍土遥感监测与制图研究为主要脉络, 系统阐述近年来国内外的研究进展, 并从盐渍土监测的主要原理、遥感数据源、盐渍土信息提取方法、研究中存在的问题和研究热点等方面做了归纳与总结。在此基础上, 本文指出结合多源遥感数据、大尺度样本库和野外调查数据, 并采用机器学习模型和专家知识判断进行分区土壤盐分定量反演已成为研究的主要范式。未来, 图像增强、多源异构数据融合、模型环境协变量改进等方法将是盐渍土遥感的重点发展方向。

关键词: 土壤盐渍化; 遥感; 动态监测; 信息提取

DOI: 10.16507/j.issn.1006-6055.2025.01.004

CSTR: 32308.14.1006-6055.2025.01.004

Research Progress and Prospect of Saline Soil Monitoring Based on Remote Sensing Technology^{*}

GENG Mengqing¹ TANG Xiayu¹ LI Xuecao^{*,1,2} WEN Ya'nan³
LI Baoguo¹ LIU Han^{4,5} HUANG Jianxi^{1,2} KONG Xiangbin¹
ZHANG Chao¹ MIAO Shuangxi^{1,2}

(1. School of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Remote Sensing for Agri-Hazards, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing

^{*} 国家自然科学基金“基于超分辨率卷积与图斑边缘优化的土地覆盖精细制图方法研究”(42301461), 国家重点研发计划重点专项“大数据驱动的耕地质量演变预测模型和产量估测模型建立”(2023YFD1501305-1)

^{**} E-mail: xuecaoli@cau.edu.cn

- 100083, China; 3. School of Information Engineering, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
4. Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China;
5. Science and Technology Innovation Bureau, State-owned Assets Supervision and Administration Commission of the State Council, Beijing 100053, China)

Abstract: Soil salinization is a critical factor restricting the sustainable development of agroecology and social economy, and has become a global environmental issue. As one of the advanced technologies for detecting and identifying distant targets, remote sensing technology has the characteristics of comprehensive, macroscopic, and dynamic, and has been widely applied in the monitoring of the distribution, salinization degree and dynamic change of saline soil. To accurately and comprehensively understand and summarize the research progress, limitations, and future development trends of remote sensing technology in the application of saline soil, and to better support the management and utilization of saline soils, land resource allocation, and socio-economic development, this study focuses on the research of remote sensing monitoring and mapping of saline soils. It systematically reviews the recent research progress at home and abroad, and summarizes the main principles of saline soil monitoring, remote sensing data sources, information extraction methods of saline soil, existing problems and research hotspots. On this basis, this paper points out that integrating multi-source remote sensing data, large-scale sample databases, and field survey data, combined with machine learning models and expert knowledge, has become the main paradigm for regionalized quantitative inversion of soil salinity. In the future, methods such as image enhancement, multi-source heterogeneous data fusion, and improvements to environmental covariates in models will be key development directions in remote sensing of saline soil.

Keywords: Soil Salinization; Remote Sensing; Dynamic Monitoring; Information Extraction

土壤盐渍化会引起作物生产力下降和土壤结构变差,是土地退化和荒漠化形成的重要原因,对全球的资源及生态环境产生了严重威胁^[1-3]。盐渍化是指自然和人类活动导致的表层土壤盐分超出某一限度的现象,受土壤水盐运动的共同作用,广泛分布于干旱、半干旱和滨海地区^[4,5]。目前,由于不合理的土地资源开发及气候变化影响,全球盐渍土面积增速较快,严重制约了农业生产和生态的可持续发展^[6-8]。及时掌握盐渍土的分布、盐渍化程度及其时空变化信息,对于盐渍土的治理和开发利用、合理配置土地资源及推动社会经济发展至关重要。

土壤盐渍化是随降水等气象条件变化而高度动态的过程,遥感技术具有观测范围广、获取速度快等特点,可以满足快速获取大范围盐渍土时空动态信息的需求。传统野外监测土壤盐分的方法往往需要及时取样分析,人力物力成本高昂,且受限于研究点位的数量和分布,在大范围获取土壤盐分信息的能力上仍存在一定局限^[9,10]。遥感技

术是利用星载或机载传感器探测和识别远距离目标的综合技术,侧重于获取大尺度下多波段、多时相的地物电磁波谱信息并进行成像,因此能够提供及时、准确、大范围、动态的地表反射率信息^[11-14]。利用遥感技术监测盐渍土能更好地掌握其空间分布及盐渍化程度,且监测更新速度快,人力成本相对较低。

自 20 世纪 70 年代以来,遥感技术已经被广泛用于盐渍土的动态监测。随着传感器技术的发展,遥感数据的光谱分辨率、空间分辨率、时间分辨率及辐射分辨率不断提高,光学遥感和合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)等数据被逐渐用于盐渍土的监测^[15-18]。随着监测水平的提高,尤其是计算机技术的发展,盐渍土制图与监测研究逐渐由人工目视解译转变为计算机自动分类分级,实现了定量化研究。近年来,诸多国内外学者除了利用不同的遥感数据源研究盐渍土的分类、土壤盐分定量反演以及长时序时空变化外^[19-22],还侧重于通过多种图像变换方法、优化

特征参数和模型来提高反演或分类的精度,以及研究盐渍土与各种环境因素和人为活动的关系^[23-27]。然而,土壤盐渍化的研究多集中于小尺度区域,主要分布在干旱半干旱气候区的内陆和滨海盐渍区,这些区域同时也是生态系统脆弱区和人类活动热点区^[28-30]。由于灌溉或降雨后土壤盐分会迅速变化,而区域尺度的盐渍土研究通常需要结合野外定点采样数据进行分析,这就需要频繁采样,导致成本过高,从而研究时间较短且不连续^[31]。联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)联合政府间土壤技术小组于 2015 年发布的《世界土壤资源状况报告》提到,已知的盐渍土范围和特征信息非常分散^[32],并且由于收集和统计数据的方法不同,例如采取不同的盐渍土分类系统,目前对区域盐渍化程度和范围的估计还存在差异,只能得到全球盐渍土面积的粗略近似值。此外,有研究特别指出需要区域和全球范围内受盐渍化影响地区的变化率数据^[33],这对盐渍土制图提出了更高的时间分辨率要求,以便捕捉土壤盐渍化动态变化的细节。

目前,仅有少数数据库提供了全球范围内量化的土壤盐分数据或盐渍化程度的分级信息。其中,世界土壤协调数据库(Harmonized World Soil Database,HWSD)^[34]是应用最广泛的数据库,也是全球土壤研究的重要数据来源,但在土壤盐分评估方面仍存在显著局限性。首先,尽管其空间分辨率为 1 公里,但实际的分辨率依赖于土壤制图单元,而部分单元的面积可达数百公里,导致其空间精度实际更加粗糙。此外,该数据库主要基于 1980 年 FAO 和联合国教科文组织创建的世界土壤地图^[35],面对土壤盐分高度动态化的特性,该数据已经过时且空间分辨率不足,制约了其

在监测土壤盐分变化及区域分布范围中的应用。

近年来,遥感技术在全球土壤盐分监测中表现出显著优势,尤其在提高时空分辨率方面取得了重要进展。例如 Ivushkin、Bartholomeus 等^[36]发现土壤盐分与冠层温度之间存在显著相关性,且热红外图像在不同气候条件和作物覆盖情况下对土壤盐分监测具有较高稳定性,其利用热红外图像在 250 米分辨率下提取了 1986—2016 年间六期的盐渍土分布范围及其程度。然而,该数据只进行了盐渍化程度的分级评估,而未对土壤盐分进行量化评价,并且其高盐度和极高盐度等级划分的准确率偏低,还会受到植物耐盐性差异引起的温度响应不确定性的影响。为弥补上述不足,Hassani、Azapagic 等^[37]基于土壤盐渍化的成因,结合多种遥感产品和环境协变量,生成了 1980—2018 年逐年 1 公里的长时序表层土壤电导率(Electrical Conductivity of Saturated Soil Paste Extract,ECe)数据集。随后,Wang、Chen 等^[38]进一步提升了空间分辨率,利用多源遥感数据绘制了分辨率高达 10 米的全球土壤盐分地图。然而该数据仅提供了一期结果,无法捕捉动态变化。尽管这些数据为识别全球土壤盐渍化热点区域作出了重要贡献,但其精度仍存在差异,难以同时满足高时空分辨率与高精度土壤盐分定量评估的需求。因此亟待摸清大尺度盐渍土的空间分布和严重程度的最新量化动态信息。

基于此,本文对国内外基于遥感技术开展盐渍土监测与制图相关研究的进展与前景进行系统归纳和总结,以期为今后开展大范围盐渍土监测提供理论基础,揭示当前面临的主要挑战,并为今后大范围盐渍地制图的发展指出方向。

1 盐渍土遥感监测的主要原理

盐渍土遥感监测主要分为直接法和间接法。

直接法是对裸土表层的土壤盐分进行监测,主要依据地表盐分和结壳的光谱反射特性或介电常数特性,可用于评估盐沼和其他高度盐渍化的非农业景观,以及监测旱地牧场中高盐地区的侵蚀或出现^[39]。然而,由于植被的广泛存在,直接法对农业地区盐渍土监测的可靠性较低。而间接法是根据植物的生长和健康状况来推断土壤根区的盐分含量,因为土壤根区盐分会影响植物生长,导致叶片的一些可见光或红外光谱反射率与健康叶片不同^[40],因此通常将植物冠层光谱反射率和热成像数据作为农业评估中的盐分指标。

1.1 直接法监测

盐渍土在不同的光谱波段上有较大的光谱反射率差异,可以依据盐渍土的光谱特征来监测土壤盐渍化。研究发现可见光(0.55~0.77 μm)、近红外(0.9~1.3 μm)、中红外(1.94~2.15 μm, 2.15~2.3 μm、2.33~2.4 μm)波段是进行盐渍土的识别或制图的关键波段^[41-43],较多盐渍土相关指数可以通过这些波段内的光谱特征进行组合。以 Landsat 为例, TM 数据 1、3、5 波段组合可

使盐渍化土壤的解译精度达到 97.6%,且盐渍土监测中常用的波段合成方式是标准假彩色合成^[44,45]。从图 1 可以看出,在 1415 nm 和 1900 nm 波长处盐渍土光谱有深吸收峰,在 580 nm、600 nm、760 nm、800 nm、900 nm、1855 nm、2100 nm 等波长处有小的反射峰。基于这些特征,一些学者采用盐渍土的敏感波段作为特征参数或设计相关指数进行盐渍土的分等定级^[46,47]。此外,盐渍化土壤的光谱反射率受多种因素影响,例如矿物成分、水分、粗糙度、颜色、表面不同含盐量和厚度的盐壳,因此经常利用盐渍土的纹理特征作为光谱特征的补充,进而提取盐渍土信息^[48,49]。小尺度的盐渍土纹理表面结晶盐往往以斑点的形式存在,较大尺度的纹理主要表现为平滑或粗糙的盐壳结构或黑白色调变化^[50],因此提取盐渍土的纹理特征并结合光谱特征进行盐渍土的分类和盐分反演,也是研究土壤盐渍化的重要手段。

土壤的盐渍化程度监测也可以通过 SAR 数据的后向散射系数进行盐渍土分级和土壤盐分反

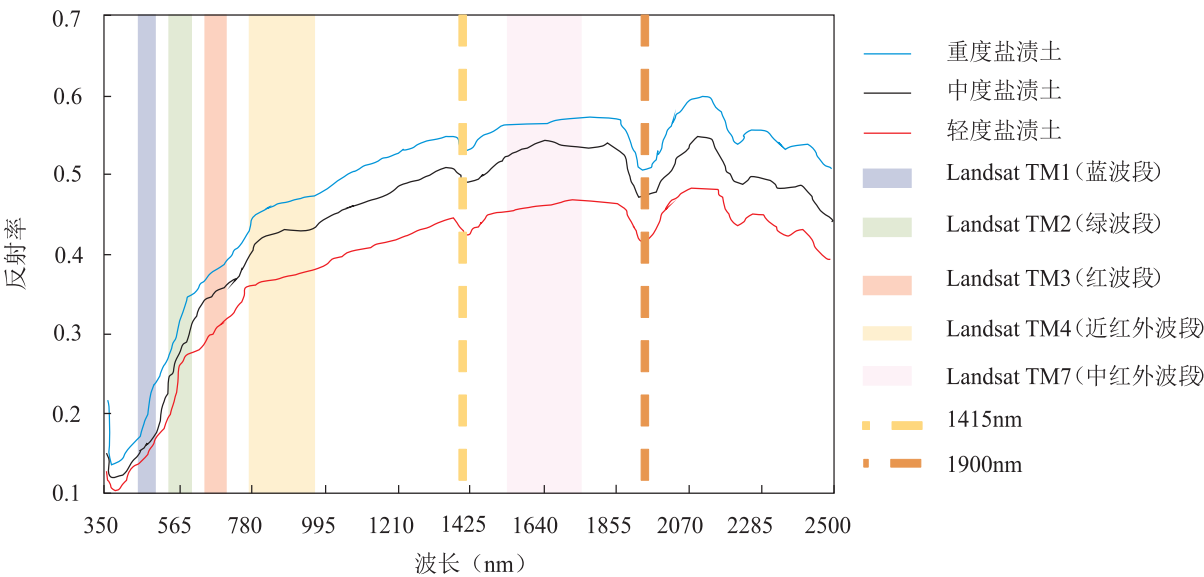


图 1 不同类型盐渍土的光谱响应^[51]

Fig. 1 Spectral responses of different types of saline soils^[51]

演来实现。土壤含盐量影响土壤介电常数的虚部,而介电常数的变化直接反映为 SAR 图像记录目标物的后向散射系数,这为通过 SAR 遥感数据监测土壤含盐量的变化提供了重要依据^[52]。首先,土壤介电常数的虚部与含盐量、频率等都有关系,图 2 是土壤含盐量与介电常数虚部以及频率的关系,可以看出在较低频率范围内,如 P、L 波段,介电常数虚部对频率的响应很显著,因而在利用 SAR 监测土壤盐渍化程度时,选用波长较长的波段($f < 2\text{GHz}$),可以取得较好的效果。其次,土壤介电常数的虚部与 SAR 影像的后向散射系数存在正相关关系^[53,54],因此通过多波段、多极化的 SAR 影像监测盐渍土是可行的。众多专家学者利用不同程度盐渍土的后向散射系数特征进行盐渍土分类分级^[55],或利用不同极化方式组合的后向散射系数反演土壤盐分来监测土壤盐渍化^[56]。

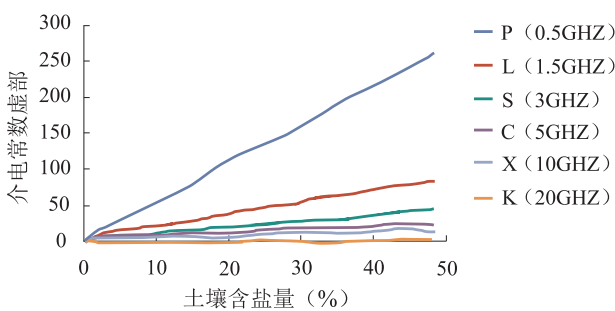


图 2 介电常数虚部与土壤含盐量之间的关系^[54]

Fig. 2 Relationship between the imaginary part of dielectric constant and soil salinity^[54]

1.2 间接法监测

在盐渍土遥感监测研究中,由于植被的广泛存在,利用间接法监测土壤盐渍化的应用性较广,特别是针对土壤盐渍化对农业生产的影响研究。因为根区土壤盐分会影响植物生长,导致植被退化以及盐生植被的出现,因此植被长势差的地区一般为土壤盐渍化程度越严重的区域^[57]。

研究表明,根区土壤盐度具体可以通过植物冠层反射率确定,作物受到根区盐分的影响时,电磁波谱中蓝色、绿色和红色区域波段的反射率增加,近红外区域的作物反射率下降^[57],且受土壤盐渍化影响植被的光谱反射率也会随着生长阶段的变化而变化^[58]。因此一些植被指数,例如归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、绿度植被指数 (Greenness Vegetation Index, GVI)、冠层响应植被指数 (Canopy Response Salinity Index, CRSI) 和物候特征参数常被用来推断卫星图像内土壤根区的盐度^[59-61]。但是单一图像的植物生长状况并不能确定是由盐分影响还是其他因素影响,例如天气、害虫等,因此这一问题可以通过使用多年的时间序列数据来解决,与其他的影响因素相比,土壤盐分相对稳定,且多年数据与土壤盐分的相关性更强^[59,62]。然而,目前有研究表明植被指数通常存在滞后响应,仅能反映植被冠层和叶绿素含量的变化,而无法即时捕捉环境胁迫导致的植被光合活性下降,从而限制了其在早期土壤盐分监测中的应用^[63-65]。相比之下,太阳诱导的叶绿素荧光 (Solar-Induced chlorophyll Fluorescence, SIF) 能够实时反映环境胁迫对植被光合活性的影响,同时受大气和土壤背景干扰较小,已被应用于旱地、耕地、草地、灌溉农田、灌木地和草原的土壤盐渍化程度评估,并为量化土壤盐渍化对植被光合作用的影响提供了有效的工具^[66]。此外,由于受土壤盐渍化影响的植物冠层温度高于正常植物^[67,68],热红外图像也被用来提取土壤的盐分信息^[69,70]。然而将该方法应用于大尺度时也会有很多问题,例如不同的气候带和地区之间极端的温度差异。尽管对热红外图像数据进行标准化处理是一个可行方案,但其局限性在于未能

充分顾及影响温度的多重复杂因素。为弥补这一不足,可以引入辅助数据作为补充手段,例如土壤 pH 值、有机碳含量等。

1.3 直接法和间接法联合监测

在大尺度土壤盐渍化监测,特别是在全球监测中,涉及多种气候分区和不同土地覆盖类型的情况下,整合直接法和间接法进行土壤盐分提取非常有效。不同程度的土壤盐渍化对不同作物的影响存在差异,而作物的种植也会影响土壤盐渍化的程度。此外,不同区域的土壤盐渍化驱动因素也有所不同^[38]。在干旱地区,土壤盐分估算通常依赖于直接法计算盐分指数。相反,在沿海盐沼等湿润地区,植被指数等是土壤盐分的决定性估计指标^[71]。因此,大范围土壤盐分遥感监测通常结合直接法(基于遥感光谱特征和 SAR 数据的后向散射系数)与间接法(如植被指数提取),并利用多种环境协变量,根据不同作物类型或气候区进行分区监测,从而实现对盐分分布的高效、全面评估^[38,72]。

2 可用的遥感数据源

用于盐渍土监测的遥感数据源主要分为光学遥感(多光谱和高光谱影像)和 SAR 遥感数据(表 1)。每一种数据源的特点和适用范围不同,需要根据研究目的和区域来确定。在光学遥感中,航空影像适合于小范围盐渍土信息提取研究,空间分辨率较高。此外,不同空间和光谱分辨率的多光谱遥感影像在全球各个区域的盐渍土识别和分级研究中都进行了广泛的应用,例如 Landsat TM、ETM +、OLI、Sentinel-1、Sentinel-2、CBERS 等,但是受到波段宽度和范围的限制,很难区分复杂的地表混合光谱特征。高光谱影像具有图谱合一的特点,具备更强的地物识别能力

和更高的光谱分辨率等独特优势。但目前高光谱影像存在在轨卫星少,数据空间分辨率低、重访周期长的缺陷^[73]。而 SAR 遥感具有穿透能力强、全天候工作的特点,但整体成像强度相对较弱,且缺乏可见光图像所提供的地物光谱信息^[74]。

表 1 常用遥感数据源

Tab. 1 Common remote sensing data sources

种类	常用传感器	空间分辨率
多光谱影像	Landsat TM、ETM +	30 m
	Landsat OLI	30 m
	Sentinel-2	10 m、20 m、60 m
	CBERS-02B	19.5 m
	WorldView-2	1.85 m
	GF-1	16 m
高光谱影像	EO-1 Hyperion	30 m
	MODIS	250 m、500 m、1 km
	HJ-1A HIS	100 m
	GF-5	30 m
	资源一号 02-D	30 m
SAR 影像	RADARSAT	1 (C-band)
	ALOS-2 PALSAR	1 (L-band)
	SIR-C	2 (L、C-band)
	Sentinel-1	1 (C-band)

3 盐渍土的遥感监测方法

3.1 盐渍化区域的遥感特征提取

如表 2 所示,对于盐渍裸土和植被光谱反射率特征,数据增强是开展盐渍土遥感监测的重要手段。增强方法主要有两种方式,一种是通过选择和组合盐分敏感波段构建指数,用于盐渍土的分级分类和土壤盐分反演,例如盐分指数 (Salinity Index, SI)^[75]、植被指数 NDVI^[76] 等,以及利用新的波段组合构建多种指数,例如基于基线的盐分指数 (Baseline-Based Soil Salinity Index, BSSI)^[22]、基于 Landsat-OLI 的盐分指数 (OLI-SI)^[77] 以及混合指数^[78] 等。另一种方式是对多个波段进行数据变换来提取盐渍土核心特征并构建模型,例如 K-T 变换、K-L 变换和主成分分析等^[79,80],提取的新特征是对多光谱特征的综合,

表 2 盐渍土特征提取方法总结

Tab.2 Summary of feature extraction methods of saline soil

特征类别	特征提取方法	具体方法举例
光谱反射率特征	数据增强	波段组合构建盐分指数、植被指数
	数据变换	K-L 变换、K-T 变换、主成分分析法
	与盐渍土其他特征协同分析	纹理特征常作为表征盐渍土的辅助特征
	加入辅助环境协变量	降水、温度、pH 值等常作为光谱特征的辅助变量
SAR 特征	不同波段的多极化组合	极化组合构建盐分指数、L 和 C 波段结合
热红外特征	计算温度异常,而不是绝对温度	与该栅格的长期平均温度相减,以协调全球分析的数据
	加入辅助环境变量	如土壤沙子含量、有机碳含量、粘粒含量等土壤属性数据

基于此来提取盐渍土的分布。

不同波段的多极化特征组合是开展基于 SAR 数据的盐渍土遥感监测的主要形式。极化组合例如极化盐分指数 (Polarizability Salinity Index, PSI)、HV/HH 和 $(HV^2 + HH^2)/(HV^2 - HH^2)$ 等^[56,81] 都常作为反演模型的输入参数。除了极化特征组合,波段组合也是一种利用 SAR 影像提取盐渍土信息的方法,例如 L 和 C 波段的结合使用可用来区分土壤盐度和含水量的不同作用^[82]。

植被冠层温度和土壤盐度水平之间存在着显著相关性,因此热红外图像的使用成为盐渍土监测的一种创新方法^[68,69,83]。在利用热红外数据进行大范围的盐渍土监测中,为了协调全球不同气候带分析的数据,常采用温度异常值作为土壤盐分反演模型或盐渍土分类模型的输入变量,即对于每个栅格,减去长期的平均温度值,作为最后的温度异常值。

盐渍土的形成受诸多复杂因素的影响,纹理通常作为光谱特征提取时的辅助特征,是遥感影像上的重要信息。灰度共生矩阵法是一种典型的纹理特征提取方法,许多研究证明将遥感影像的光谱特征与纹理特征相结合,用于研究区盐渍土的分类,其分类精度相比仅依赖光谱信息的方法显著提升^[75,84,85]。部分研究通过统计纹理单元

的发生频数函数提取图像纹理特征,得出图像的纹理与图像的亮度不可分割、光谱特征与纹理特征在遥感图像模式识别中可以互相补充的结论^[79]。

此外,在盐渍土信息提取中加入辅助的环境协变量也是一种常用的盐渍土信息提取方法,可以有效提高准确度和精确度^[86,87]。辅助协变量主要包括了气候、土壤母质和特性以及地形属性^[88,89]。其中,地表蒸散发等气候因素在土壤盐渍化过程中起着重要作用,特别是在干旱和半干旱地区^[90],这主要是由于在地表蒸发的过程中,大量的可溶性盐通过土壤毛细作用到达地表,从而导致土壤盐渍化的形成^[91,92]。Jiang、Rusuli 等^[93] 从 MODIS 的蒸散发产品 (MOD16) 中获得地表蒸散发数据,连同土壤后向散射系数、盐度指数和地下水深度共同作为土壤盐分反演模型的输入参数,提高了土壤盐分的监测精度。此外,降水也会改变盐的迁移和积累,Scudiero、Skaggs 等^[71] 将降水和温度、以及作物类型数据作为冠层响应植被指数 CRSI 的辅助数据进行土壤盐分反演,并发现在模型中加入作物类型和气象数据的信息显著提高了 ECe 反演的准确度。其次,其他土壤特性也与土壤盐度有关,例如,pH、土壤有机碳含量和阳离子交换能力等^[94-96]。土壤颗粒组成、容重和质地也可以为土壤盐分监测提供辅助

信息,这主要是由于盐渍化土壤通常会受到压实的影响,而沙质土壤由于较低的持水能力,通常不容易出现盐渍化问题^[36]。同时,土壤颗粒的组成会影响土壤的保水性和保肥性,并间接决定盐分的存在^[97],这些土壤属性数据一般从世界土壤信息数据集 SoilGrids 中获取。最后,地形辅助数据一般包括地下水位深度和高程以及坡度。因为地下水的增加可能会推动含水层深层中可溶性盐地下水的入侵,从而加剧盐渍化,同时由于水分的移动,可溶性盐更容易从上坡地区迁移并在坡度较低的区域积聚^[97,98],这些协变量都可以间接反映土壤盐渍化的程度。

3.2 样本采集

盐渍土的分类分级及含盐量的反演往往依赖于样本。样本收集方法主要分为室内人工解译识别不同程度盐渍土的样本,以及野外测定、实验室化验分析土壤盐分含量或 E_{Ce} 两种。

1)室内人工解译盐渍土样本主要用于盐渍土的监督分类。一种室内解译方法是结合高分辨率的影像,直接解译影像上的盐渍土遥感信息特征来采集样本。盐渍土主要呈现为比较明显的泛白结晶状,在遥感图像上的影像色调都比其它地物浅。另外,在遥感图像上可以根据色调的深浅来区分出不同程度的盐渍化土壤,盐分含量越高,土壤光谱的亮度越强^[99]。这种室内采集盐渍土样本的方法可以选择不同时相、不同尺度的数据,在时间空间上具有很大的优势,但是只能做粗略的盐渍土程度识别,例如盐渍土和非盐渍土,在判断不同土壤盐渍化程度时还有一定的困难。而另一种室内盐渍样本解译方法是根据野外实地调查来记录每种程度盐渍土的经纬度位置,再在室内进行样本的标定,或基于非遥感资料,例如土壤调查报告、土壤实地调查资料等,在

影像上进行盐渍土样本采集,虽然这种方法能给出比较明确的等级,但非常耗时耗力^[100]。

2)而野外采集土壤样本、实验室化验分析主要用于土壤盐分的反演研究,获得的指标一般用土壤全盐含量和 E_{Ce} 表示。土壤盐含量主要通过重量法(烘干残渣法)在实验室化验分析获得,它的精确度高、适用范围广,但操作比较麻烦、工作量大、成本高。E_{Ce} 可以利用基于地面的土壤电导性电磁仪器在野外直接测量^[92],或者在实验室测定土壤浸提液测得^[101]。这种野外采集土壤样本的方法,同时一般还需要使用手持 GPS 定位仪测定各样区中心采样点的实地坐标,并记录地点、方位、植被类型等环境因素信息,工作量比较大,而且空间上采样点的分布、数量也很有限,数据获取的成本较高,但是可以很准确地提取土壤盐分的信息,不太适合做大范围的监测和推广。

目前,世界土壤信息服务(World Soil Information Service, WoSIS)提供了唯一一个覆盖全球的土壤盐分样本点数据集^[102]。该数据库汇编了约 10⁵ 个全球地理参考土壤剖面样本^[103],并记录了 18148 个土壤剖面顶部层的 E_{Ce} 数据^[104]。然而,由于部分当地数据持有者可能不愿公开数据,样本点的分布存在不均匀性,例如在北美分布较为密集,而在亚洲则较为稀疏。尽管如此, WoSIS 数据库仍是全球土壤盐分研究中最全面且最新的资源,被广泛应用于全球的盐渍土程度制图以及土壤盐分定量反演^[36-38,105]研究。

3.3 模型

3.3.1 盐渍土分类分级

盐渍土的分类方案一般是结合野外调查和研究区遥感影像的目视解译来确定,根据地物的地面特征,一般将研究区地面覆盖类型分为非盐渍土、轻度盐渍土、中度盐渍土、重度盐渍土和盐

土五类。目前,土壤盐渍化程度的分级标准在不同研究中存在较大差异,尚未统一。根据《第三次全国土壤普查土壤类型名称校准技术规范》,盐渍化程度可根据 0 ~ 20 cm 厚土层中含盐量多少以及与植物生长的关系分为五个等级,分别对应上述五个类别(表 3)。

表 3 盐渍土分类分级方案^[72]

Tab. 3 Classification and grading scheme of saline soil^[72]

类别	等级	定义
非盐渍土	1	表层土壤盐分含量 0 ~ 0.1%,对作物不产生盐害
轻度盐渍土	2	表层土壤盐分含量 0.1% ~ 0.2%,对盐分极敏感的作物产量可能受到影响
中度盐渍土	3	表层土壤盐分含量 0.2% ~ 0.4%,对盐分敏感的作物产量可能受到影响
重度盐渍土	4	表层土壤盐分含量 0.4% ~ 0.6%,只有耐盐作物有收成且影响产量
盐土	5	表层土壤盐分含量 0.6% ~ 1.6%,只有少数耐盐作物生长

盐渍土的分类分级一般是通过监督分类和专家知识决策的方法来实现。首先,监督分类是盐渍土分级分类的主要方式,根据不同的样本,例如盐渍土和非盐渍土或者不同等级的样本,通过之前提取的光谱特征、SAR 特征等,结合监督分类模型来进行分类分级。采用的模型主要包括经典统计分析模型(例如最大似然法等^[100])和机器学习模型(例如模糊分类^[106]、神经网络^[107]、支持向量机^[108]、分类回归树^[109]、自适应增强决策树^[72]、随机森林^[36]和极端梯度提升^[110]等)。此外,一些专家学者综合监督分类和非监督分类方法,在算法上加以改进,以提高自动分类的精度^[111]。另一种方法是通过专家判断(例如气候和微地形等),确定每一种类别和等级特征的阈值,进而实现盐渍土的分类分级^[112]。

3.3.2 土壤盐分含量的定量反演

土壤盐分的定量反演就是构建反演参数,并

结合采样点土壤盐分含量数据建立相应的反演模型,以获得大范围的土壤盐分含量^[113]。在模型方法方面,一种是经典统计分析反演模型^[114-116],例如多元线性回归、偏最小二乘回归、地理加权回归、分位数回归等线性回归分析模型等。但是多数反演参数与土壤含盐量之间存在着非线性关系^[117],一些非线性机器学习模型,例如反向传播(Back Propagation, BP)神经网络、支持向量机以及随机森林等分类器在反演土壤盐分上有很大优势。当前,基于回归和分类树的集成模型已能够实现对不同纬度、经度、土壤深度和时间段的四维土壤盐分反演,从而支持土壤盐渍化的动态时空预测^[37]。

3.4 精度评价

盐渍土制图的精度评价主要取决于土壤盐渍化识别的特征,以及对于盐渍土分类制图和定量反演的要求。评价土壤盐渍化程度分级的精度一般是通过分类后的图像,分层随机抽样,进一步通过野外调查或人工解译的方式识别出具体的盐渍土类型,再进行混淆矩阵的计算,最终得到总体分类精度、Kappa 系数、用户精度、生产者精度等相关精度评价指标^[75]。而定量反演是根据野外采样的一部分样本,采用决定系数、均方根误差、平均绝对百分误差、平均相对误差和相对分析误差预测偏差等对模型性能进行评价^[81,113,118]。研究表明,随着植被覆盖度的增加,盐渍土制图的平均精度逐渐降低,例如湖泊湿地($R^2 = 0.81$) > 绿洲($R^2 = 0.76$) > 沿海区域($R^2 = 0.74$) > 农田($R^2 = 0.71$)^[119]。此外,不同卫星数据的选择对模型性能的影响较小,但 Sentinel-2($R^2 = 0.72$)的表现仍优于 Landsat($R^2 = 0.66$),而在算法选择上,随机森林($R^2 = 0.70$)和支持向量机($R^2 = 0.71$)展现出了最佳的性能表现^[120]。

4 目前研究存在的问题

4.1 数据源的问题

目前,单一数据源仍然有一定的局限,必须要均衡空间、时间、光谱和辐射分辨率,多源数据融合将是盐渍土监测的主要方式。首先,多光谱数据受到多云雨天气的影响,很难在特定的时间获得大面积的无云遥感数据,且无法实现全天候监测,而这一问题可以被 SAR 数据来解决。同时,多光谱数据有长时序的特征,但是多源传感器的波段宽度不定、反射率上还存在着差异,所以目前动态盐渍土监测还存在着局限和难点。同时,高光谱数据在可获取性上还存在着限制,特别是大面积、高空间分辨率的高光谱数据还比较少。而利用 SAR 数据监测土壤盐渍化时,地表粗糙度等对后向散射系数的影响较大,这些因素受技术和仪器设备的限制难以获取,且目前的土壤盐分反演研究中多数只是利用了 SAR 数据的后向散射系数,没有将介电常数模型深入耦合起来开展研究。未来需要研究整合这些来自不同平台和技术的数据,因为每种数据都可能捕捉到对土壤盐度监测至关重要的信息。

4.2 大尺度样本的问题

限制全球土壤盐度评估可靠性的主要问题在于大尺度样本点的空间分布不均,时间覆盖度不足以及数据的一致性缺失。目前,全球盐渍土的制图主要基于 WoSIS 土壤剖面数据库。然而,该数据库具有显著的空间异质性和空间集聚效应,大部分土壤剖面样本来源于农业用地,而山地、陡坡、沙漠、沙丘以及热带雨林等区域的采样严重不足。这种不均匀性显著限制了数字盐渍土制图的精度,并成为关键的不确定性来源。此外,样本的采样日期与卫星影像获取日期的匹配至关重要,这直接影响地表盐分与遥感光谱数据

之间的相关性。然而,由于该数据库的采样时间范围局限于 1950—2014 年,且大量样本点缺失采样日期等关键信息,对多时相模型的训练精度造成了显著影响。

4.3 建模过程中的问题

盐渍土的建模过程主要涉及到盐渍土特征的构建、特征的选择与使用、模型选择等问题。首先在特征方面,利用光学遥感影像监测盐渍土时主要利用盐渍土的光谱特征,然而盐渍土的光谱特征受多种因素影响,在大尺度盐渍土研究中具有高度复杂性,因此难以在大范围内获得统一的特征参数。在不同区域和气候带,以及不同的作物覆盖条件下,选用的光谱特征参数需要具有鲁棒性,因此,未来应加强参数优化与综合方法的研究。

其次,在利用间接法监测盐渍土时,不同的植被类型和生长阶段对土壤盐分的光谱、热红外反射率的响应不同,但很少有研究使用耐盐植被。耐盐植被与普通植被的盐度响应函数不同,耐盐植被会在中等盐度水平下生长的最好^[71],并且冠层温度的升高幅度相比不耐盐植被较小。在全球尺度研究中,由于不同地区植被的生长季节分布不均,包含了不同类型的植被或无植被覆盖区域,从而增加了监测的不确定性。因此使得盐渍土信息提取变得复杂,未来应多注重植被特异性信息,把植被类型和生长阶段数据纳入模型。

最后,当融合使用环境协变量时,变量多且复杂,而且有些变量目前还存在一些问题,当环境协变量的分辨率不高时,在盐渍土监测中不会提高其提取精度^[71]。此外,如何确定环境协变量的种类和权重还有待进一步研究。在模型选择上,机器学习模型虽然能很好的反演出土壤盐分与特征参数的非线性关系,但是一些模型缺乏特

征优选的能力,而且模型参数的调试直接影响算法的预测精度、运算速度和稳健性。

5 未来研究展望

盐渍土面积分布广且类型众多,如何合理利用开发和治理盐渍土十分迫切。遥感技术可以用来准确、快速、动态的获得盐渍土信息,是目前研究土壤盐渍化的主要手段。利用遥感监测土壤盐渍化主要是根据裸土和植被的光谱特征、纹理特征、SAR 特征和热红外辐射特征等,结合地面实测数据进行建模,从而实现盐渍土的分类分级或土壤盐分的定量反演。在这一过程中,通过多源数据融合,采取数学变换构建各种特征参数并结合环境协变量,利用机器学习模型来分区定量反演土壤盐分已成为目前研究中的热点。然而,现有研究仍面临监测精度、驱动机制、时空变化及大尺度适用性等问题,未来仍需深入探索和完善。

5.1 监测方法优化

1)多源异构数据的融合是实现综合利用多种遥感数据源开展盐渍土监测的重要途径。众多学者综合各种数据的优点进行数据融合,如融合多光谱与高光谱数据以获得高空间分辨率和高光谱分辨率的遥感数据^[121,122],以及利用时空融合算法,以获得高时空分辨率的影像^[123]。还有一些研究将多光谱图像与 SAR 图像进行融合,以获取盐渍土的光谱信息和实现全天候动态监测^[25,74]。盐渍土监测对高时间、高空间分辨率的要求较高,因为土壤盐度可能在相邻的区域变化很大,而且其光谱和热红外响应随着植物生长阶段也在变化。然而,最高的分辨率对于盐渍土信息提取来说不一定是最佳的,例如 MODIS 虽然在空间分辨率方面存在不足,但其在时间分辨率上

显著优于 Sentinel-2 和 Landsat,这种时间序列数据的优势使其在预测生长季盐度动态方面更加高效^[124]。此外,在实际农业管理中,较粗尺度的盐度预测已能够满足需求^[120]。多源数据融合可以充分互补优势,进一步提高影像分析与目标识别的能力,未来应该将研究重点放在多空间、多时间、多传感器的数据融合分析方法,以提高分类效果和反演精度^[125]。未来,传感器向高光谱的方向发展,例如高分系列的卫星,可以支持大范围的盐渍土监测研究。高光谱传感器提供大量具有高空间分辨率的光谱带,与多光谱传感器相比,可以将盐生植物与非盐生植物区分开来,以及更清楚地识别表面盐分的细节特征,由于多波段植被指数一直是盐渍土遥感中的主要测量指标,而高光谱传感器提供了一个信息更丰富的作物状态测量方法,可以更详细地绘制土壤盐分图^[33,126,127]。此外,还应鼓励采用或开发用于盐度监测的新传感器技术,如太赫兹辐射光谱技术和电磁感应技术等^[128,129]。

2)盐渍土遥感分类和土壤盐分反演模型的优化对于开展大范围的监测具有重要意义。目前,相关研究对盐渍土信息提取的敏感性特征进行了优化和筛选。例如,一些专家学者通过引入短波红外波段改进了植被指数优化特征^[130],相关研究还基于全子集筛选算法筛选出最佳的土壤盐分反演参数组合^[131]。此外,在分类和反演模型中加入环境协变量可以提高准确性,且高分辨率的协变量可以提高在较低的盐度水平下的盐分监测性能,因此未来更高分辨率的协变量数据也是一个研究重点。近些年,一些专家学者完成了很多高分辨率的全球和国家尺度的土壤属性制图,包括土壤有机碳含量、pH、饱和水分含量等,例如 250 米分辨率的 SoilGrids^[132] 和 30 米分

分辨率的土壤调查地理数据库 (Probabilistic Remapping of Soil Survey Geographic, POLARIS)^[133]。未来研究应进一步优化机器学习模型,以提升盐渍土信息提取的精度和可靠性。当前,已有研究尝试利用遗传算法和贝叶斯优化算法,针对机器学习模型的回归参数和模型参数进行优化,以提升模型的性能和预测精度^[134,135]。然而,关于量化分类与反演模型的不确定性分析,以及在不同下垫面条件下提取盐渍土信息的精度评估,仍需进一步研究。此外,由于盐渍土的高度复杂性,其光谱特征容易受到多种因素干扰,导致严重的光谱混淆。同时,综合利用多种特征参数可能会导致信息冗余。因此,未来仍需探索如何优选与模型高度耦合的关键特征参数,以实现盐渍土的长时序动态监测与预测。

5.2 土壤盐渍化的影响和驱动因素

土壤盐渍化的影响特征及驱动要素为防止和治理土壤盐渍化提供了间接的理论基础。土壤盐渍化会导致植被退化,所以相关研究计算了植被覆盖度和改进盐渍化指数,探索了不同程度盐渍土对植被覆盖度的影响特征,以期对植被恢复、控制土壤盐渍化提供科学依据^[136]。

土壤盐渍化的形成原因主要分为自然和人为因素,并且在不同地区表现出显著的差异。以往在盐渍土的自然影响因子上研究较为集中,土壤盐渍化与地下水水文过程和土壤密切相关,因为土壤中盐分随水分运动,而高温、干燥、大风等气候条件会使潜水蒸发,从而导致土壤的积盐,因此土壤盐渍化与气候、地形、水文状况和土壤质地都有直接关系^[100,137]。此外,土壤盐渍化的成因也存在地域性差异。在干旱和半干旱地区,盐渍化通常是由于强烈的蒸发作用引发的淋溶

过程所导致,即水分蒸发过程中盐分在土壤表面浓缩。而在湿润和沿海地区,土壤盐渍化的主要原因则是地下水的上升或海水的入侵^[138]。因此,在大尺度的研究中,进行气候分区,并根据不同区域的环境特征选择合适的协变量进行监测,显得尤为重要。

在土壤盐渍化驱动因素的研究方法上,有拟合单一环境变量和土壤盐分的关系式从而分析其相关性的方法,例如通过人工神经网络拟合模型等。然而,土壤盐渍化是一个动态过程,各种影响因子共同导致这一动态的变化,所以通常将多个自然影响因子同时分析,如通过灰色关联度方法来分析各自然因子与土壤盐分的关联度,从而找出影响土壤盐分含量最为活跃、最为直接的因素^[139]。此外,在使用机器学习模型结合多种环境协变量进行土壤盐分反演的过程中,还可以得到各个变量的重要性排序,从而识别出对盐渍化影响最大的因素。而在研究人类活动对土壤盐渍化的影响时,由于人类对土地的干扰最直接表现在土地利用上,因此造成土壤盐渍化的人为因素主要考虑土地覆被的变化,如人类对于绿洲的破坏会加速土壤盐渍化的发展^[6]。

5.3 盐渍土变化监测与预测

土壤盐渍化是多种原因长期共同作用的结果,且具有高度动态性,其会在灌溉或降雨后迅速发生变化^[36],研究盐渍土的长期动态变化对于盐渍土治理具有重要意义。然而,目前关于盐渍土长时序、连续变化的研究仍然较为有限。土壤盐渍化的动态变化监测首先要对不同时相、不同遥感平台的数据进行几何配准和辐射归一化处理。几何配准的关键是地面控制点和重采样方法的选择,而辐射校正主要采用数值回归校正法、平均标准方差法、直方图匹配法等,目的是实

现不同时相、不同传感器间的光谱转换,提高时间序列数据在盐渍土长时间动态监测中的一致性^[118,140]。另一重要因素是环境协变量的时间分辨率,它对盐渍土变化的影响至关重要。例如,应用最广泛的 SoilGrids 土壤属性数据库是静态的,这在很大程度上限制了其在动态盐渍土变化监测中的应用。

利用遥感技术实现盐渍土的变化监测主要有两种方法,分类后对比法和逐像元比较法。前者要先对遥感影像进行盐渍土的分类,可以获取每个像元的变化类型,而后者是直接将各景遥感影像进行对比,如影像比值法和影像差值法等。有研究将影像差值法、影像比值法和分类后对比法同时应用于盐渍土的动态变化监测,发现这几种方法对盐渍土的变化监测都有一定的效果,但分类后对比法对于有目的的变化监测而言更有优势,其结果很大程度上取决于每期影像单独分类的精度^[80]。最后,在这种长时序的土壤盐分反演研究中,尽管获取的时间序列影像的成像时间已与样本的获取时间尽可能接近,但还是存在差异,而且在几何配准和相对辐射校正时会产生误差,这些因素都会影响盐渍土动态监测的结果。

土壤盐渍化已成为全球重要的环境与社会经济问题之一,且预计在气候变化的加剧下将进一步恶化。当前已有研究通过构建气候变量与土壤盐分之间的关系模型,并结合未来气候模拟数据,预测了全球干旱区土壤盐度及其在气候变化背景下直至 2100 年的演变趋势^[105]。然而,此研究主要聚焦于气候变化对于干旱区盐渍土的影响,尚未全面考虑人类活动(如灌溉)对土壤盐渍化的潜在作用。未来研究应进一步整合人类活动的影响,以全面评估土壤盐渍化的驱动因素及其动态变化。

5.4 大范围盐渍土监测

盐渍土是一种非地带性的隐域问题,分布不均且主要以斑块状形式聚集^[50],其特性不仅引发光谱特征的混合效应,还显著增加了大尺度统一建模的复杂性。在目前大范围的盐渍土调查中,如何综合利用现有的盐渍化监测方法,构建适用于多种情景和气候条件的统一模型和通用方法,仍需进一步深入研究。结合以上关于区域和全球盐渍土提取的方法,大范围的盐渍土监测可以采用逐层筛除非盐渍土区域的方法,来准确地提取盐渍地,如先通过坡度、地形湿润指数和土地覆盖等多源遥感数据进行盐渍土区域的粗提取,再通过各种遥感指数进行精细提取,例如结合土壤调查数据、盐度指数和归一化植被指数进行盐渍土的分级。而另一种大范围盐渍土监测的方法是通过采集土壤全盐含量或 ECe 样本作为盐渍土分类或土壤盐分反演模型的训练样本,从而确定盐渍土的范围和程度,然而,这种大范围样本采集通常依赖于土壤数据库,而目前可用的全球土壤盐分或 ECe 数据库仍然较为匮乏,由于盐渍土的高度动态性和非均质性,选择一个成本低、可靠和有效的取样方案是土壤样本收集的瓶颈之一。此外,利用这些有限的数据库并结合机器学习等方法进行土壤盐分反演,仍面临样本稀缺、模型泛化性不足等诸多挑战。

参考文献

[1] LI J, PU L, HAN M, et al. Soil salinization research in China: advances and prospects [J]. Journal of geographical sciences, 2014, 24: 943-960.

[2] 亢庆, 于嵘, 张增祥, 等. 土壤盐碱化遥感应用研究进展 [J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(4): 447-454.

- [3] FAO. Soil salinization as a global major challenge | ITPS soil letter #3 [EB/OL]. (2021) [2025-02-10]. <https://www.fao.org/global-soil-partnership/resources/highlights/detail/en/c/1412475/>.
- [4] KAYA F, SCHILLACI C, KESHAVARZI A, et al. Predictive mapping of electrical conductivity and assessment of soil salinity in a Western Türkiye alluvial plain[J]. Land, 2022, 11(12): 2148
- [5] PEREIRA CS, LOPES I, ABRANTES I, et al. Salinization effects on coastal ecosystems: A terrestrial model ecosystem approach [J]. Philosophical transactions of the royal society B, 2019, 374(1764): 20180251.
- [6] GORJI T, SERTEL E, TANIK A. Monitoring soil salinity via remote sensing technology under data scarce conditions: A case study from turkey [J]. Ecological indicators, 2017, 74: 384-391.
- [7] 黄晶, 孔亚丽, 徐青山, 等. 盐渍土壤特征及改良措施研究进展[J]. 土壤, 2022, 54(1): 18-23.
- [8] MUKHOPADHYAY R, SARKAR B, JAT H S, et al. Soil salinity under climate change: Challenges for sustainable agriculture and food security [J]. Journal of environmental management, 2021, 280: 111736.
- [9] WANG Z, ZHANG F, ZHANG X, et al. Regional suitability prediction of soil salinization based on remote-sensing derivatives and optimal spectral index [J]. Science of the total environment, 2021, 775: 145807.
- [10] VERMEULEN D, VAN NIEKERK A. Machine learning performance for predicting soil salinity using different combinations of geomorphometric covariates [J]. Geoderma, 2017, 299: 1-12.
- [11] PENG J, BISWAS A, JIANG Q, et al. Estimating soil salinity from remote sensing and terrain data in southern Xinjiang province, China [J]. Geoderma, 2019, 337: 1309-1319.
- [12] SINGH A. Managing the salinization and drainage problems of irrigated areas through remote sensing and GIS techniques [J]. Ecological indicators, 2018, 89: 584-589.
- [13] REN D, WEI B, XU X, et al. Analyzing spatiotemporal characteristics of soil salinity in arid irrigated agro-ecosystems using integrated approaches [J]. Geoderma, 2019, 356: 113935.
- [14] SOLANGI KA, SIYAL AA, WU Y, et al. An assessment of the spatial and temporal distribution of soil salinity in combination with field and satellite data: A case study in Sujawal District [J]. Agronomy, 2019, 9(12): 869.
- [15] KILIC OM, BUDAK M, GUNAL E, et al. Soil salinity assessment of a natural pasture using remote sensing techniques in central Anatolia, Turkey [J]. Plos one, 2022, 17(4): e0266915.
- [16] ALAMDAR S, GHAZBAN F, ZAREI A. Efficiency of machine learning algorithms in soil salinity detection using landsat-8 OLI imagery [J]. ISPRS annals of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, 2023, 10: 49-55.
- [17] TOLA D, SATGÉ F, PILLCO ZOLÁ R, et al. Soil salinity mapping of plowed agriculture lands combining radar sentinel-1 and optical sentinel-2 with topographic data in machine learning models [J]. Remote sensing, 2024, 16(18): 3456.
- [18] MUKHAMEDIEV R I, MEREMBAYEV T, KUCHIN Y, et al. Soil salinity estimation for south kazakhstan based on SAR sentinel-1 and

- landsat-8, 9 OLI data with machine learning models [J]. Remote sensing, 2023, 15 (17): 4269.
- [19] LI X, LI Y, WANG B, et al. Analysis of spatial-temporal variation of the saline-sodic soil in the west of Jilin Province from 1989 to 2019 and influencing factors [J]. Catena, 2022, 217: 106492.
- [20] KUMAR P, TIWARI P, BISWAS A, et al. Spatio-temporal assessment of soil salinization utilizing remote sensing derivatives, and prediction modeling: Implications for sustainable development [J]. Geoscience frontiers, 2024, 15 (6): 101881.
- [21] ABOELSOUD H M, ABDELRAHMAN M A E, KHEIR A M S, et al. Quantitative estimation of saline-soil amelioration using remote-sensing indices in arid land for better management [J]. Land, 2022, 11(7): 1041.
- [22] ZHANG Z, FAN Y, ZHANG A, et al. Baseline-based Soil Salinity Index (BSSI): A novel remote sensing monitoring method of soil salinization [J]. IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing, 2022, 16: 202-214
- [23] SALCEDO F P, CUTILLAS P P, CABAÑERO JJA, et al. Use of remote sensing to evaluate the effects of environmental factors on soil salinity in a semi-arid area [J]. Science of the total environment, 2022, 815: 152524.
- [24] MOHAMED S A, METWALY M M, METWALLI M R, et al. Integrating active and passive remote sensing data for mapping soil salinity using machine learning and feature selection approaches in arid regions [J]. Remote sensing, 2023, 15(7): 1751.
- [25] HE Y, ZHANG Z, XIANG R, et al. Monitoring salinity in bare soil based on sentinel-1/2 image fusion and machine learning [J]. Infrared physics & technology, 2023, 131: 104656.
- [26] LI Y, CHANG C, WANG Z, et al. Upscaling remote sensing inversion and dynamic monitoring of soil salinization in the yellow river delta, China [J]. Ecological indicators, 2023, 148: 110087.
- [27] GAO L, SONG X, LI X, et al. An enhanced saline soil dielectric constant model used for remote sensing soil moisture and salinity retrieval [J]. Remote sensing, 2024, 16(3): 452.
- [28] ZHANG J, ZHANG Z, CHEN J, et al. Estimating soil salinity with different fractional vegetation cover using remote sensing [J]. Land degradation & development, 2021, 32(2): 597-612.
- [29] SHAHRAYINI E, NOROOZI A A. Modeling and mapping of soil salinity and alkalinity using remote sensing data and topographic factors: a case study in Iran [J]. Environmental modeling & assessment, 2022, 27(5): 901-913.
- [30] HOSSEN B, YABAR H, FARUQUE M J. Exploring the potential of soil salinity assessment through remote sensing and GIS: case study in the coastal rural areas of bangladesh [J]. Land, 2022, 11(10): 1784.
- [31] 丁建丽, 王飞. 干旱区大尺度土壤盐度信息环境建模——以新疆天山南北中低海拔冲积平原为例 [J]. 地理学报, 2017, 72(1): 64-78.
- [32] FAO, ITPS. Status of the world's soil resources (SWSR)-main report [R]. Rome: food and agriculture organization of the united nations and

- intergovernmental technical panel on soils,2015.
- [33] HOPMANS J W, QURESHI A S, KISEKKA I, et al. Critical knowledge gaps and research priorities in global soil salinity[J]. *Advances in agronomy*, 2021,169:1-191.
- [34] NACHTERGAELE F, VAN VELTHUIZEN H, VERELST L, et al. Harmonized world soil database version 2.0[M]. FAO, Rome,2023.
- [35] FAO-UNESCO. Soil map of the world, volume V Europe,1:5 000 000[R]. Rome:FAO,1981.
- [36] IVUSHKIN K, BARTHOLOMEUS H, BREGT AK, et al. Global mapping of soil salinity change [J]. *Remote sensing of environment*,2019,231: 111260.
- [37] HASSANI A, AZAPAGIC A, SHOKRI N. Predicting long-term dynamics of soil salinity and sodicity on a global scale[J]. *Proceedings of the national academy of sciences*, 2020, 117 (52): 33017-33027.
- [38] WANG N, CHEN S, HUANG J, et al. Global soil salinity estimation at 10 m using multi-source remote sensing [J]. *Journal of remote sensing*, 2024,4:0130.
- [39] FURBY S, CACCETTA P, WALLACE J. Salinity monitoring in western australia using remotely sensed and other spatial data [J]. *Journal of environmental quality*,2010,39(1):16-25.
- [40] CARTER G A. Responses of leaf spectral reflectance to plant stress [J]. *American journal of botany*,1993,80(3):239-243.
- [41] CSILLAG F, PÁSZTOR L, BIEHL LL. Spectral band selection for the characterization of salinity status of soils [J]. *Remote sensing of environment*,1993,43(3):231-242.
- [42] RAO BRM, SHARMA R C, RAVI SANKAR T, et al. Spectral behaviour of salt-affected soils [J]. *International Journal of remote sensing*,1995,16 (12):2125-2136.
- [43] CROWLEY J K. Mapping playa evaporite minerals with AVIRIS data: A first report from death valley, california [J]. *Remote sensing of environment*,1993,44(2-3):337-356.
- [44] DWIVEDI RS, RAO BRM. The selection of the best possible landsat TM band combination for delineating salt-affected soils [J]. *International journal of remote sensing*,1992,13(11):2051-2058.
- [45] DWIVEDI R S, SREENIVAS K, RAMANA K V. Inventory of salt-affected soils and waterlogged areas: a remote sensing approach [J]. *International journal of remote sensing*,1999,20 (8):1589-1599.
- [46] 樊彦国,侯春玲,朱浩,等. 基于 BP 神经网络的盐渍土盐分遥感反演模型研究[J]. *地理与地理信息科学*,2010,26(6):24-27.
- [47] NAWAR S, BUDDENBAUM H, HILL J, et al. Modeling and mapping of soil salinity with reflectance spectroscopy and landsat data using two quantitative methods (PLSR and MARS) [J]. *Remote sensing*, 2014, 6 (11): 10813-10834.
- [48] 翁永玲,宫鹏. 土壤盐渍化遥感应用研究进展 [J]. *地理科学*,2006,26(3):369-375.
- [49] 黄静,赵庚星,奚雪,等. 光谱与纹理信息结合的黄河三角洲土壤盐渍化信息提取——以垦利区为例[J]. *农业资源与环境学报*,2022,39 (3):1-14.
- [50] METTERNICHT G I, ZINCK J. Remote sensing of

- soil salinity: potentials and constraints [J]. Remote sensing of environment, 2003, 85(1): 1-20.
- [51] JIN P, LI P, WANG Q, et al. Developing and applying novel spectral feature parameters for classifying soil salt types in arid land [J]. Ecological indicators, 2015, 54: 116-123.
- [52] 刘全明. 含盐土壤盐渍化雷达反演模拟研究[J]. 测绘通报, 2014, (9): 43-46.
- [53] 邵芸, 吕远, 董庆, 等. 含水含盐土壤的微波介电特性分析研究[J]. 遥感学报, 2021, 6(6): 416-423.
- [54] 雷磊. 盐渍土介电特性研究及对雷达图像的响应分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2011.
- [55] 买买提·沙吾提. 微波遥感数据在盐渍地信息提取中的应用研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2008.
- [56] 李彪, 王耀强. 土壤盐渍化雷达反演模拟研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(8): 180-184.
- [57] LOBELL D, LESCH S, CORWIN D, et al. Regional - scale assessment of soil salinity in the red river valley using multi - year MODIS EVI and NDVI[J]. Journal of environmental quality, 2010, 39(1): 35-41.
- [58] THOMAS J, WIEGAND C, MYERS V. Reflectance of cotton leaves and its relation to yield 1[J]. Agronomy journal, 1967, 59(6): 551-554.
- [59] WHITNEY K, SCUDIERO E, EL-ASKARY H M, et al. Validating the use of MODIS time series for salinity assessment over agricultural soils in California, USA [J]. Ecological indicators, 2018, 93: 889-898.
- [60] 许迪, 王少丽, 蔡林根. 利用 NDVI 指数识别作物及土壤盐碱分布的应用研究[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(6): 5-8.
- [61] WIEGAND C, RHOADES J, ESCOBAR D, et al. Photographic and videographic observations for determining and mapping the response of cotton to soil salinity [J]. Remote sensing of environment, 1994, 49(3): 212-223.
- [62] LOBELL D B, ORTIZ-MONASTERIO J I, GURROLA F C, et al. Identification of saline soils with multiyear remote sensing of crop yields[J]. Soil science society of America journal, 2007, 71(3): 777-783.
- [63] CHEN X, MO X, ZHANG Y, et al. Drought detection and assessment with solar-induced chlorophyll fluorescence in summer maize growth period over North China Plain [J]. Ecological indicators, 2019, 104: 347-356.
- [64] LIU L, YANG X, ZHOU H, et al. Relationship of root zone soil moisture with solar-induced chlorophyll fluorescence and vegetation indices in winter wheat: A comparative study based on continuous ground-measurements [J]. Ecological indicators, 2018, 90: 9-17.
- [65] SONG Y, WANG J, WANG L. Satellite solar-induced chlorophyll fluorescence reveals heat stress impacts on wheat yield in India [J]. Remote sensing, 2020, 12(20): 3277.
- [66] DU R, XIANG Y, CHEN J, et al. Potential of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) to access long-term dynamics of soil salinity using OCO-2 satellite data and machine learning method[J]. Geoderma, 2024, 444: 116855.
- [67] GÓMEZ-BELLOT M J, NORTES P A, SÁNCHEZ-

- BLANCO M J, et al. Sensitivity of thermal imaging and infrared thermometry to detect water status changes in *Euonymus japonica* plants irrigated with saline reclaimed water [J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 133:21-32.
- [68] URRESTARAZU M. Infrared thermography used to diagnose the effects of salinity in a soilless culture [J]. *Quantitative InfraRed Thermography journal*, 2013, 10(1):1-8.
- [69] IVUSHKIN K, BARTHOLOMEUS H, BREGT A K, et al. Satellite thermography for soil salinity assessment of cropped areas in Uzbekistan [J]. *Land degradation development*, 2017, 28(3):870-877.
- [70] IVUSHKIN K, BARTHOLOMEUS H, BREGT A K, et al. Soil salinity assessment through satellite thermography for different irrigated and rainfed crops [J]. *International journal of applied earth observation geoinformation*, 2018, 68:230-237.
- [71] SCUDIERO E, SKAGGS T H, CORWIN D L. Regional-scale soil salinity assessment using Landsat ETM + canopy reflectance [J]. *Remote sensing of environment*, 2015, 169:335-343.
- [72] 张胜男, 陆苗, 温彩运, 等. 融合作物类型的土壤盐分遥感反演方法研究 [J]. *测绘通报*, 2024(2):1-7.
- [73] 童庆禧, 张兵, 张立福. 中国高光谱遥感的前沿进展 [J]. *遥感学报*, 2016, 20(5):689-707.
- [74] 依力亚斯江·努尔麦麦提. 雷达与 TM 图像融合及分类的土壤盐渍化信息遥感监测研究 [D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2008.
- [75] 黄静, 赵庚星, 奚雪, 等. 光谱与纹理信息结合的黄河三角洲土壤盐渍化信息提取——以垦利区为例 [J]. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(3):1-14.
- [76] 张素铭, 赵庚星, 王卓然, 等. 滨海盐渍区土壤盐分遥感反演及动态监测 [J]. *农业资源与环境学报*, 2018, 35(4):349-358.
- [77] EL HARTI A, LHISSOU R, CHOKMANI K, et al. Spatiotemporal monitoring of soil salinization in irrigated Tadla Plain (Morocco) using satellite spectral indices [J]. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 2016, 50:64-73.
- [78] CHENG T, ZHANG J, ZHANG S, et al. Monitoring soil salinization and its spatiotemporal variation at different depths across the Yellow River Delta based on remote sensing data with multi-parameter optimization [J]. *Environmental science and pollution research*, 2022, 1-17.
- [79] 骆玉霞, 陈焕伟. GIS 支持下的 TM 图像土壤盐渍化分级 [J]. *遥感信息*, 2001(4):12-15.
- [80] DWIVEDI R, SREENIVAS K. Image transforms as a tool for the study of soil salinity and alkalinity dynamics [J]. *International journal of remote sensing*, 1998, 19(4):605-619.
- [81] 再屯古丽·亚库普, 买买提·沙吾提, 阿卜杜萨拉木·阿布都加帕尔, 等. 基于 PALSAR 雷达数据的于田绿洲土壤盐渍化反演 [J]. *资源科学*, 2018, 40(10):2110-2117.
- [82] CARVER K, BUSH T. Airborne multispectral remote sensing of saline seeps: the 1978 Harding Co., South Dakota experiment [R]. Las Cruces: New Mexico State University, 1979.
- [83] ISHIMWE R, ABUTALEB K, AHMED F. Applications of thermal imaging in agriculture—A review [J]. *Advances in remote sensing*, 2014, 3(3):128.

- [84] YANG H, WANG Z, CAO J, et al. Estimating soil salinity using Gaofen-2 imagery: A novel application of combined spectral and textural features[J]. *Environmental research*, 2023, 217: 114870.
- [85] 张飞, 丁建丽, 买买提·沙吾提, 等. ICA 结合纹理特征的 SVM 盐渍化信息提取研究[J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(9): 193-197.
- [86] CACCETTA P A. Remote sensing, geographic information systems (GIS) and Bayesian knowledge – based methods for monitoring land condition [D]. PhD diss. Perth: Curtin University of Technology, 1997.
- [87] TAGHIZADEH-MEHRJARDI R, MINASNY B, SARMADIAN F, et al. Digital mapping of soil salinity in Ardakan region, central Iran [J]. *Geoderma*, 2014, 213: 15-28.
- [88] DE SOUSA L M, POGGIO L, BATJES N H, et al. SoilGrids 2. 0: producing quality-assessed soil information for the globe [J]. *Soil discussions*, 2020; 1-37.
- [89] WADOUX AMJC, MINASNY B, and MCBRATNEY A B. Machine learning for digital soil mapping: Applications, challenges and suggested solutions [J]. *Earth-science reviews*, 2020, 210: 103359.
- [90] ASFAW E, SURYABHAGAVAN K, ARGAW M. Soil salinity modeling and mapping using remote sensing and GIS: The case of Wonji sugar cane irrigation farm, Ethiopia [J]. *Journal of the Saudi society of agricultural sciences*, 2018, 17 (3): 250-258.
- [91] ABLIZ A, TIYIP T, GHULAM A, et al. Effects of shallow groundwater table and salinity on soil salt dynamics in the Keriya Oasis, Northwestern China [J]. *Environmental earth sciences*, 2016, 75: 1-15.
- [92] DEHAAN R, TAYLOR G. Field-derived spectra of salinized soils and vegetation as indicators of irrigation-induced soil salinization [J]. *Remote sensing of environment*, 2002, 80(3): 406-417.
- [93] JIANG H, RUSULI Y, AMUTI T, et al. Quantitative assessment of soil salinity using multi-source remote sensing data based on the support vector machine and artificial neural network [J]. *International journal of remote sensing*, 2019, 40(1): 284-306.
- [94] AL-BUSAIDI A S, COOKSON P. Salinity-pH relationships in calcareous soils [J]. *Journal of agricultural and marine sciences [JAMS]*, 2003, 8(1): 41-46.
- [95] SETIA R, GOTTSCHALK P, SMITH P, et al. Soil salinity decreases global soil organic carbon stocks [J]. *Science of the total environment*, 2013, 465: 267-272.
- [96] SAIDI D. Importance and role of cation exchange capacity on the physicals properties of the Cheliff saline soils (Algeria) [J]. *Procedia engineering*, 2012, 33: 435-449.
- [97] NABIOLLAHI K, TAGHIZADEH-MEHRJARDI R, SHAHABI A, et al. Assessing agricultural salt-affected land using digital soil mapping and hybridized random forests [J]. *Geoderma*, 2021, 385: 114858.
- [98] JOBBÁGY E G, JACKSON R B. Groundwater and soil chemical changes under phreatophytic tree plantations [J]. *Journal of Geophysical research: biogeosciences*, 2007, 112(G2): 1-15.

- [99] 徐冬青. 遥感技术应用于土壤盐渍化动态监测 [D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2005.
- [100] 龚新梅. 绿洲盐渍化的遥感监测及其环境因素影响分析——以三工河流域为例 [D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2004.
- [101] 尹建道,孙佳杰,郝志强,等. 天津滨海地区土壤含盐量与电导率的关系 [J]. 安徽农业科学,2010,38(30):16882-16883.
- [102] RIBEIRO E D C, BATJES N H, LEENAARS J G B, et al. Towards the standardization and harmonization of world soil data: Procedures manual ISRIC World Soil Information Service (WoSIS version 2.0) [R]. Wageningen:ISRIC, 2015.
- [103] WADOUX A M J C, MINASNY B, MCBRATNEY A B. Machine learning for digital soil mapping: Applications, challenges and suggested solutions [J]. Earth-science reviews, 2020, 210: 103359.
- [104] BATJES N H, RIBEIRO E, VAN OOSTRUM A. Standardised soil profile data to support global mapping and modelling (WoSIS snapshot 2019) [J]. Earth system science data, 2020, 12(1): 299-320.
- [105] HASSANI A, AZAPAGIC A, SHOKRI N. Global predictions of primary soil salinization under changing climate in the 21st century [J]. Nature communications, 2021, 12(1): 6663.
- [106] METTERNICHT G. Analysing the relationship between ground based reflectance and environmental indicators of salinity processes in the Cochabamba Valleys (Bolivia) [J]. International journal of ecology environmental sciences, 1998, 24(4): 359-370.
- [107] EVANS F H. An investigation into the use of maximum likelihood classifiers, decision trees, neural networks and conditional probabilistic networks for mapping and predicting salinity [D]. Australia: Curtin University of Technology, 1998.
- [108] XIAO C, JI Q, CHEN J, et al. Prediction of soil salinity parameters using machine learning models in an arid region of northwest China [J]. Computers and electronics in agriculture, 2023, 204: 107512.
- [109] 花锦溪,臧淑英,那晓东. 基于 MODIS 时间序列的松嫩平原盐渍地提取 [J]. 地理与地理信息科学, 2016, 32(2): 67-71.
- [110] LIU X, HU Y, LI X, et al. An interpretable model for salinity inversion assessment of the south bank of the Yellow River based on optuna hyperparameter optimization and XGBoost [J]. Agronomy, 2024, 15(1): 18.
- [111] 刘志明,晏明,何艳芬. 吉林省西部土地盐碱化研究 [J]. 资源科学, 2004, 26(5): 111-116.
- [112] 何祺胜,丁建丽. 基于决策树方法的干旱区盐渍地信息提取——以渭干河-库车河三角洲绿洲为例 [J]. 资源科学, 2006, 28(6): 134-140.
- [113] 杨练兵. 基于遗传算法优化 BP 神经网络的土壤盐渍化反演 [D]. 北京:中国科学院大学, 2021.
- [114] 翁永玲,戚浩平,方洪宾,等. 基于 PLSR 方法的青海茶卡-共和盆地土壤盐分高光谱遥感反演 [J]. 土壤学报, 2010, 47(6): 1255-1263.
- [115] 袁玉芸,瓦哈甫·哈力克,关靖云,等. 基于 GWR 模型的于田绿洲土壤表层盐分空间分异及其影响因子 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3273-3282.

- [116]江远东,李新国,杨涵,等. 博斯腾湖湖滨绿洲土壤表层含盐量高光谱估算模型[J]. 中国土壤与肥料,2022(1):1-8.
- [117]张飞,塔西甫拉提·特依拜,丁建丽,等. 塔里木河流域中游渭干河-库车河绿洲盐渍土水盐信息光谱特征研究[J]. 地理与地理信息科学,2012,28(1):65-70.
- [118]张子璇,宋雨桐,张惠中,等. 水文气候影响下黄河三角洲土壤盐分时空动态[J]. 应用生态学报,2021,32(4):1393-1405.
- [119]WANG F, HAN L, LIU L, et al. Advancements and perspective in the quantitative assessment of soil salinity utilizing remote sensing and machine learning algorithms: A review [J]. Remote sensing,2024,16(24):4812.
- [120]SHI H, HELLWICH O, LUO G, et al. A global meta-analysis of soil salinity prediction integrating satellite remote sensing, soil sampling, and machine learning [J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2021,60:1-15.
- [121]王爽,丁建丽,王璐,等. 基于地表光谱建模的区域土壤盐渍化遥感监测研究[J]. 干旱区地理,2016,39(1):190-198.
- [122]厉彦玲,赵庚星,常春艳,等. OLI 与 HSI 影像融合的土壤盐分反演模型[J]. 农业工程学报,2017,33(21):173-180.
- [123]HAN L, DING J, GE X, et al. Using spatiotemporal fusion algorithms to fill in potentially absent satellite images for calculating soil salinity: A feasibility study[J]. International journal of applied earth observation and geoinformation,2022,111:102839.
- [124]ZHANG T-T, QI J-G, GAO Y, et al. Detecting soil salinity with MODIS time series VI data [J]. Ecological indicators,2015,52:480-489.
- [125]WU W, AL-SHAFIE WM, MHAIMEED A S, et al. Soil salinity mapping by multiscale remote sensing in Mesopotamia, Iraq [J]. IEEE journal of selected topics in applied earth observations, 2014,7(11):4442-4452.
- [126]GUPTA R P. Remote sensing geology [M]. Berlin:Springer,2017.
- [127]DUTKIEWICZ A. Evaluating hyperspectral imagery for mapping the surface symptoms of dryland salinity[D]. Adelaide:The University of Adelaide,2006.
- [128]BROWNE M, YARDIMCI N T, SCOFFONI C, et al. Prediction of leaf water potential and relative water content using terahertz radiation spectroscopy [J]. Plant direct, 2020, 4(4):e00197.
- [129]FAO. Global symposium on salt-affected soils: Outcome document [R]. Rome: Food and agriculture organization of the united nations, 2022.
- [130]陈红艳,赵庚星,陈敬春,等. 基于改进植被指数的黄河口区盐渍土盐分遥感反演[J]. 农业工程学报,2015,31(5):107-114.
- [131]张智韬,韩佳,王新涛,等. 基于全子集-分位数回归的土壤含盐量反演研究[J]. 农业机械学报,2019,50(10):142-152.
- [132]HENGL T, MENDES J J, HEUVELINK G B, et al. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning [J]. Plos One,2017,12(2):e0169748.
- [133]CHANEY N W, MINASNY B, HERMAN J D, et al. POLARIS soil properties: 30 - m

probabilistic maps of soil properties over the contiguous United States [J]. Water resources research,2019 ,55 (4) :2916-2938.

[134] WANG L, HU P, ZHENG H, et al. Integrative modeling of heterogeneous soil salinity using sparse ground samples and remote sensing images[J]. Geoderma,2023 ,430 :116321.

[135] 杨练兵,陈春波,郑宏伟. 基于优化随机森林回归模型的土壤盐渍化反演[J]. 地球信息科学学报,2021 ,23 (9) :1662-1674.

[136] 杨志辉,赵军,温媛媛. 青土湖区植被与土壤盐渍化响应研究[J]. 干旱地区农业研究,2020 ,38 (3) :231-237.

[137] 杨建强,罗先香. 土壤盐渍化与地下水动态特征关系研究[J]. 水土保持通报,1999 (6) :11-15.

[138] CORWIN D L. Climate change impacts on soil salinity in agricultural areas [J]. European journal of soil science,2021 ,72 (2) :842-862.

[139] 张同娟,杨劲松,刘广明,等. 基于灰色关联度法河口地区土壤盐分影响因子分析[J]. 土壤通报,2010 ,41 (4) :793-796.

[140] 关元秀,刘高焕. 区域土壤盐渍化遥感监测研究综述[J]. 遥感技术与应用,2001 ,16 (1) :40-44.

作者贡献说明

耿梦清:收集政策报告资料,分析数据,撰写文章初稿;

唐夏雨:撰写文章初稿;

李雪草:提出写作思路,修改文章细节;

温亚楠:指导论文方向并提出调整意见;

李保国:论文修改;

刘 涵:论文修改;

黄健熙:论文修改;

孔祥斌:论文修改;

张 超:论文修改;

苗双喜:论文修改。